

种植不同植物的人工湿地深度处理 城镇污水厂尾水研究

王豹, 魏桃员*, 刘畅, 王健

武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年5月9日; 录用日期: 2024年6月18日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

为了探究人工湿地深度处理污水厂尾水的效能以及不同植物的选择对湿地系统运行效率的影响及原因, 本文以湖北某城区污水厂二期尾水处理人工湿地为研究对象, 对种植美人蕉、花叶芦竹、鸢尾、旱伞草四种湿地植物的不同单元进行测样, 并对数据进行相关性分析。美人蕉、花叶芦竹、鸢尾、旱伞草对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为74.6%、67.8%、65.1%、64.9%, 与植物量及N累积量相关性不显著; 对TN的平均去除率分别为58.6%、60.5%、56.6%、57.4%, 与地下N累积量显著正相关; 对TP的平均去除率分别为77.2%、77.1%、72.6%、73.7%, 与生物量和地下P累积量显著相关。经过垂直潜流人工湿地和平流人工湿地协同处理后, 尾水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP指标均能达到(GB3838-2002) IV类水质标准, 证明复合式人工湿地系统能有效地实现对氮磷等污染物的去除, 为其他污水厂后续改造, 提升出厂水质提供了经济又稳定的解决方法。

关键词

城市污水厂尾水, 人工湿地, 湿地植物, 生物量

Research on the Depth Treatment of Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent Using Artificial Wetlands Planted with Different Types of Plants

Bao Wang, Taoyuan Wei*, Chang Liu, Jian Wang

School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: May 9th, 2024; accepted: Jun. 18th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 王豹, 魏桃员, 刘畅, 王健. 种植不同植物的人工湿地深度处理城镇污水厂尾水研究[J]. 有机化学研究, 2024, 12(2): 291-298. DOI: 10.12677/jocr.2024.122026

Abstract

In order to explore the efficiency of deep treatment of municipal wastewater treatment plant effluent using artificial wetlands and the impact and reasons of different plant choices on the operational efficiency of wetland systems, the study focuses on the secondary effluent treatment artificial wetland in a certain urban area of Hubei Province as the research object, and measures different units of wetland plants planted with four types of plants: banana, reed bamboo, iris, and dry umbrella grass, and conducts correlation analysis on the data. The average removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ by banana, reed, iris, and upland grass were 74.6%, 67.8%, 65.1%, and 64.9%, respectively, and were not significantly correlated with plant biomass and N accumulation; the average removal rates of TN were 58.6%, 60.5%, 56.6%, and 57.4%, respectively, which were significantly positively correlated with the accumulation of underground nitrogen; the average removal rates of TP were 77.2%, 77.1%, 72.6%, and 73.7%, respectively, which were significantly correlated with biomass and underground P accumulation. After the collaborative treatment of vertical subsurface flow artificial wetlands and parallel flow artificial wetlands, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN, and TP indicators of the effluent can all meet the class IV water quality standards (GB3838-2002), proving that the composite artificial wetland system can effectively remove pollutants such as nitrogen and phosphorus, providing an economic and stable solution for the subsequent renovation of other wastewater treatment plants and improving the effluent water quality.

Keywords

Municipal Wastewater Treatment Plant Effluent, Artificial Wetlands, Wetland Plants, Biomass

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工湿地是指模拟自然湿地的结构和功能,人为地将低浓度污水投配到由填料与水生动植物及微生物构成的独特生态系统中,通过物理、化学、生物的协同作用改善水质以达到排放标准。由于其低造价、易维护、效能稳定且生态价值突出而被广泛用于乡镇污水厂尾水处理[1][2]。张倩妮等[3]对29种水生植物净化能力进行聚类分析,结果表明水葱等为中净化能力植物,香蒲和芦苇等为高净化能力植物。程丽芬等[4]通过对人工湿地处理煤矿废水发现,光合作用更高的植物对煤矿废水的适应性更强。关于水生植物净化水体的研究多集中在净化效果分析,对水生植物在尾水条件下的净化能力和相关性研究不足,且大都停留在小试和中试规模。本文以湖北某乡镇污水处理厂配套人工湿地为研究对象,分析了人工湿地工程在实际运行过程中选用不同湿地植物对污染物的处理效果以及处理效率与生物量和氮磷累积量之间的关系。以期进一步了解其在尾水处理中不同植物的差异性和影响因素,为尾水深度净化及植物选择提供参考依据。

2. 工程概况及系统设计

2.1. 工程概况

该项目位于湖北省荆州市某地,地处长江边,由于该污水厂原有的工艺不能达到最新IV类水质排放

标准, 后续增加的明矾处理工艺成本过大, 因此在污水厂北侧修建了人工湿地尾水处理工程。工程设计处理量为 2 万 t/d, 水力停留时间设计为 48 h。本项目通过建设人工湿地水质净化工程, 将监利(容城)城区污水处理厂尾水和工业园新区污水处理厂尾水水质中几个主要指标(COD, BOD₅, NH₄⁺-N, TN, TP)从(GB18918-2002)一级 A 标准提升至达到(GB3838-2002) IV 类水质标准, 用于周边公园和水系补水。平流湿地(SFW)占地面积 22,460 m², 垂直潜流湿地(SSFW)净面积 21,600 m², 分为 24 个单元, 其中四种湿地植物各占六个单元。基质的配置见表 1。该地是典型的亚热带季风气候, 实验时间为 2023 年 6 月~9 月, 正处夏季, 平均气温为 23℃~32℃, 光照充足且降雨较少, 此时人工湿地系统已运行至稳定。由于项目均处于露天环境且修建时均采用同种材料, 因此不考虑温度、降雨, 基质对实验结果的影响。

Table 1. SSFW matrix composition

表 1. SSFW 基质组成

填料	位置(从上往下)	厚度(mm)	基质粒径(mm)
碎石:沸石 = 2:1	第一层	300	8~12
碎石	第二层	300	15~25
大粒径砾石	第三层	300	30~60

2.2. 人工湿地进水

四种湿地均为并列关系, 由布水管道将污水厂处理后的尾水输送至每块湿地单元, 以确保每个湿地系统进水的水质和水量一致。实验期间由于污水厂进水浓度和处理效果等因素的影响, 人工湿地系统进水水质也有所波动。进水总氮浓度(mg/L)介于 6.2~9.64 之间, 平均进水浓度为 8.37 mg/L; 负荷(g/m²·d)在 2.87~4.46 之间, 平均为 3.88 g/(m²·d)。进水总磷浓度(mg/L)介于 0.13~0.72 之间, 平均进水浓度为 0.39 mg/L, 负荷(g/m²·d)在 0.06~0.33 之间, 平均为 0.18 g/(m²·d)。进水氨氮浓度(mg/L)介于 2.08~7.62 之间, 平均进水浓度为 5.19 mg/L; 负荷(g/m²·d)在 0.96~3.53 之间, 平均为 2.40 g/(m²·d)。

2.3. 人工湿地植物配置

该项目分为垂直潜流人工湿地(SSFW)和平流人工湿地(SFW), 其中 SSFW 分为 24 个单元, 四种湿地植物配置如表 2 所示。

Table 2. SSFW plant configuration

表 2. SSFW 植物配置

植物	种植密度(株/m ²)
美人蕉	5
黄花鸢尾	20
花叶芦竹	15
旱伞草	20

3. 检测指标与分析方法

每周对当日进水及各区块潜流湿地及平流湿地出水取样, 当日在污水厂水质分析实验室对水样各项指标进行检测。COD 的测定使用重铬酸钾法(HJ/T399-2007), TN 的测定采用过硫酸钾-紫外分光光度法(HJ636-2012), TP 的测定采用钼酸盐分光光度法(GB11893-89), NH₄⁺-N 的测定采用纳氏试剂分光光度法

(HJ 535-2009), 每周绘制 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的标准曲线并对系统进水出水的各项水质指标进行检测, 各水质指标的去除率 = $[(\text{进水口值} - \text{出水口值})/\text{进水口值}] \cdot 100\%$ [5]。

运用 SPSS 27.0.1 软件的方差分析功能进行显著性分析。对四种湿地 1 m^2 内的植物进行收割并分为地上和地下两部分, 将样品放入烘箱 105°C 杀青 3 h, 然后 80°C 烘干至恒重; 测定重量即为生物量, 然后粉碎过筛, 经过 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮使之成为溶液, 然后用上述方法测定其 N、P 浓度, 计算得到植被 N、P 累积量。

植被 N、P 累积量 = 植被体内 N、P 浓度 \times 植被生物量[6]

4. 结果分析

4.1. 对 TN 的去除效果

人工湿地中的氮主要通过植物吸收、硝化-反硝化、基质储存和挥发等作用被去除[7]。植物通过吸收后转化的方式脱氮率只有 11.3% [8]。图 1 为系统对 TN 的去除效果分析, 四种植物对 TN 均有较好的去除效果, 其中平均去除率花叶芦竹(60.5%) > 美人蕉(58.6%) > 旱伞草(57.4%) > 鸢尾(56.6%)。经过垂直潜流人工湿地和平流湿地组合处理后, 最终系统 TN 去除率平均为 79.4%, 平均出水 TN 浓度为 1.71 mg/L , 出水浓度较为稳定, 除 7 月 17 日(2.75 mg/L)及 8 月 28 日(2.73 mg/L)外均达到了 IV 类水质的 TN 排放标准($\leq 2 \text{ mg/L}$), 其原因为当日污水厂尾水 TN 浓度过高以及雨水流入导致系统负荷增加, 未能达到处理要求。可以通过养殖固体废物投加增加碳氮比和厌氧区深度从而促进系统对 N 的去除效果[9]。在夏季由于气温升高和光照加强, 湿地植物对污染物的吸收作用也相应增强, 人工湿地的 TN 平均去除率达到峰值, 这与贾艾晨[10]等人的研究一致。

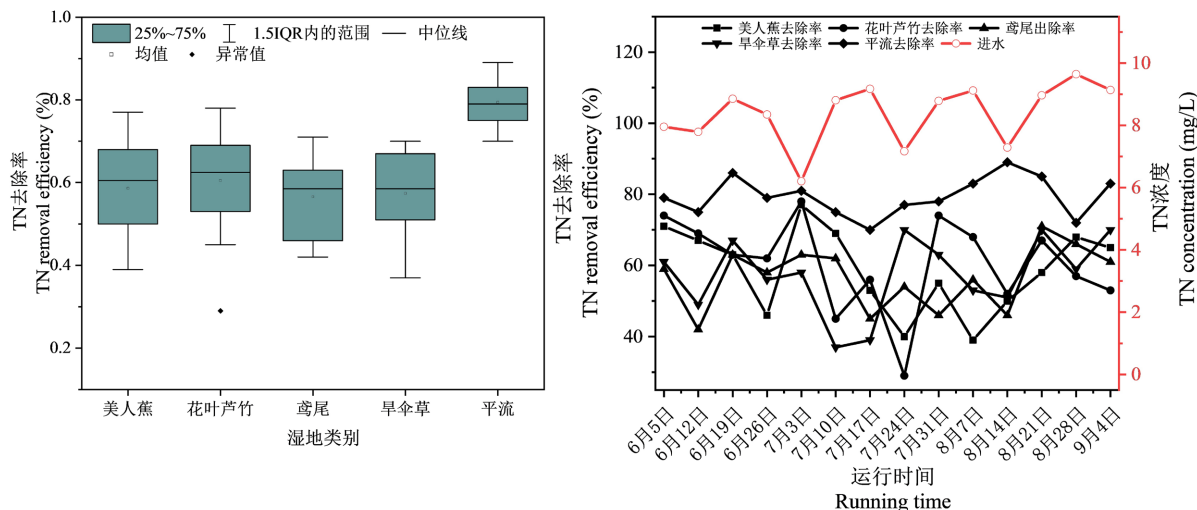


Figure 1. Effect of four kinds of plants on TN removal
图 1. 四种植物对 TN 的去除效果

4.2. 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

图 2 为系统对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果分析, 平均去除率美人蕉(74.6%) > 花叶芦竹(67.8%) > 鸢尾(65.1%) > 旱伞草(64.9%)。由箱线图可知四种植物中美人蕉对氨氮的去除效果最好且最稳定。经过垂直潜流人工湿地和平流湿地组合处理后, 最终系统 TN 去除率平均为 77.7%, 平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 1.09 mg/L , 实验期间均达到了 IV 类水质的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 排放标准($\leq 2 \text{ mg/L}$)。人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的主要去除途径

为植物吸收、附着生物的同化作用及硝化反硝化作用等[11]。水生植物为根际圈微生物进行硝化反硝化过程提供了有利条件，以此促进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为硝态氮和亚硝态氮，并最终转化为 N_2 逸出水面，达到污水脱氮效果[12]。植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的直接吸收较少，但是其根部会分泌碳源和氧气[13] [14] [15]，有利于硝化细菌和反硝化细菌的生长，通过硝化细菌作用将氨氮转化为硝态氮，再经由反硝化细菌作用转化为 N_2 [16]。

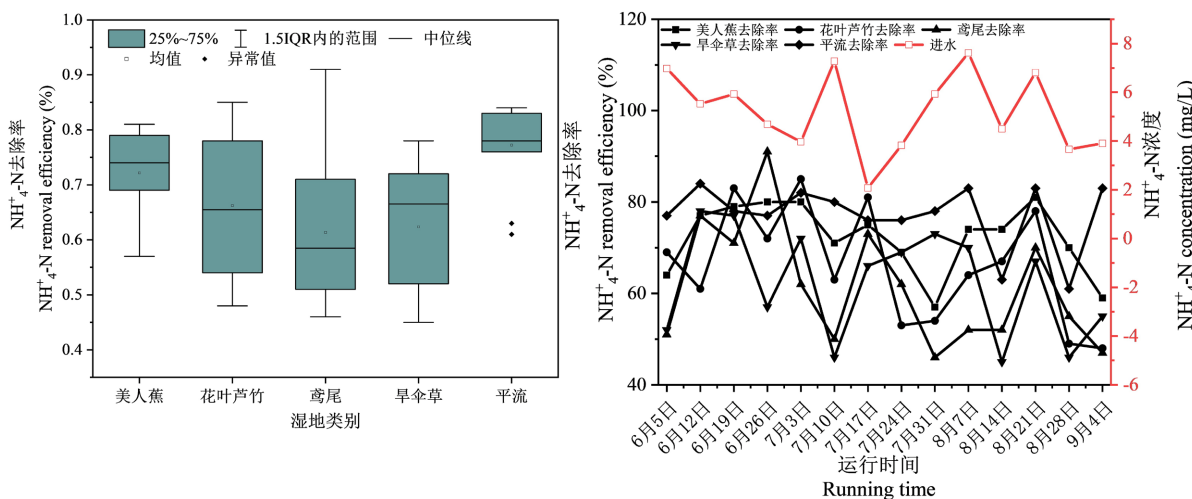


Figure 2. Effect of four kinds of plants on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal
图 2. 四种植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

4.3. 对 TP 的去除效果

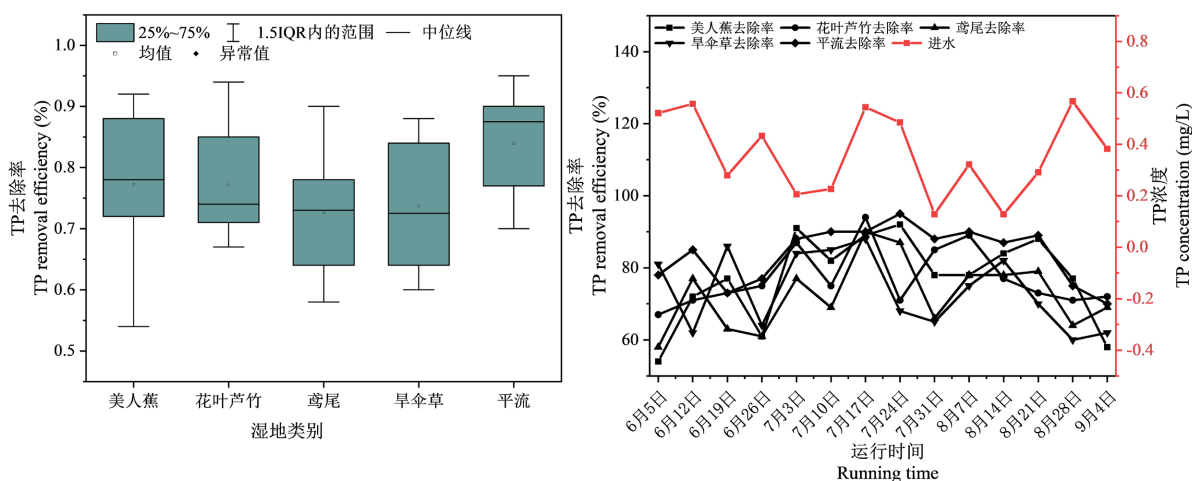


Figure 3. Effect of four kinds of plants on TP removal
图 3. 四种植物对 TP 的去除效果

如图 3 所示，四种植物对 TP 去除效果差异不大且均有较好的累积效果，其中平均去除率美人蕉 (77.2%) > 花叶芦竹 (77.1%) > 旱伞草 (73.7%) > 鸢尾 (72.6%)。美人蕉和花叶芦竹去除效果好于旱伞草和鸢尾。最终系统出水 TP 平均去除率为 83.9%，平均出水 TP 浓度为 0.06 mg/L，远低于 IV 类水质的 TP 排放标准 (≤ 0.4 mg/L)。湿地中的磷主要通过植物吸收、基质吸附沉淀和微生物的同化作用去除[17]。由于

该人工湿地的水力负荷较小,磷与基质接触的时间较长,增强了基质吸附沉积去除 TP 的效能,同时有利于生物膜附着于基质表面生长,加之根际微生物对有机磷的矿化和吸收作用[18],因而对磷的处理效果较为突出。

4.4. 四种植物的生物量及氮磷累积量

由图 4 可知四种植物地上生物量差异性显著($P < 0.05$),具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 旱伞草 > 鸢尾;地下生物量差异性显著($P < 0.05$),具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 旱伞草 > 鸢尾。

地上 N 累积量具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 旱伞草 > 鸢尾;地下 N 累积量具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 旱伞草 > 鸢尾,不同植物地上地下 N 累积量差异性均显著($P < 0.05$)。

地上 P 累积量差异性显著($P < 0.05$),具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 鸢尾 > 旱伞草;地下 P 累积量美人蕉与花叶芦竹差异不显著($P > 0.05$),鸢尾与旱伞草差异性显著($P < 0.05$),具体表现为美人蕉 > 花叶芦竹 > 旱伞草 > 鸢尾。

四种植物地上的 N、P 累积量均显著高于地下累积量,说明四种植物外部吸收的氮磷向上部迁移累积的较多,且在茎叶中富集,这有利于后续的收割去除系统中的氮磷元素。

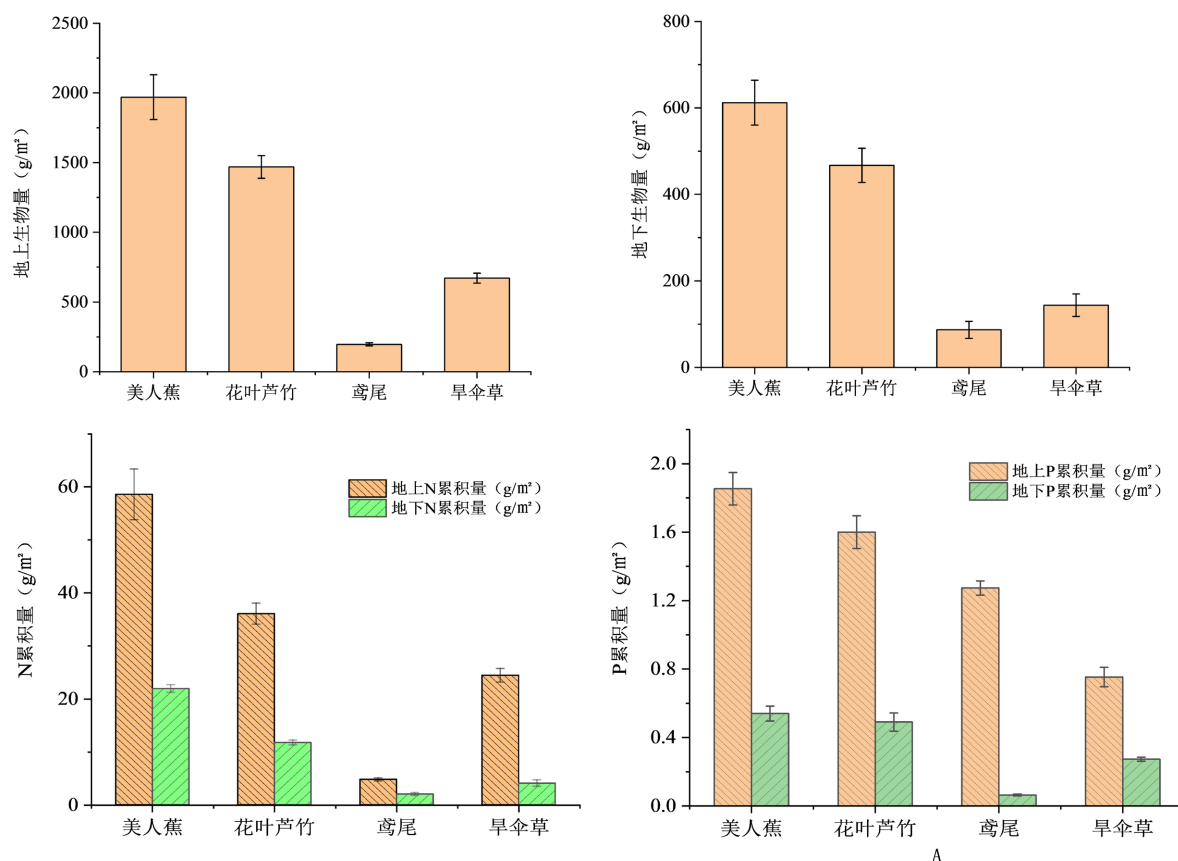


Figure 4. Biomass and nitrogen and phosphorus accumulation of four species of plants

图 4. 四种植物的生物量及氮磷累积量

4.5. 各指标与去除率之间的相关性

采用 Pearson 相关系数分析法对其相关性进行分析,由表 3 结果可知。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率和地上生物量, 地下生物量, 地上 N 累积量, 地下 N 累积量, 地上 P 累积量, 地下 P 累积量的相关不显著($P > 0.05$);

TN 去除率和地下 N 累积量呈显著正相关($P < 0.05$), 和地上生物量, 地下生物量, 地上 N 累积量, 地上 P 累积量, 地下 P 累积量的相关不显著($P > 0.05$);

TP 去除率和地上生物量, 地下生物量和地下 P 累积量呈显著正相关($P < 0.05$), 和地上 N 累积量, 地下 N 累积量, 地上 P 累积量相关不显著($P > 0.05$)。

Table 3. Correlation analysis of removal rate

表 3. 去除率相关性分析

	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率	TN 去除率	TP 去除率
地上生物量	-0.502	0.865	0.969*
地下生物量	-0.485	0.867	0.972*
地上 N 累积量	-0.626	0.905	0.900
地下 N 累积量	-0.681	0.961*	0.892
地上 P 累积量	-0.429	0.760	0.769
地下 P 累积量	-0.341	0.744	0.975*

注: * $P < 0.05$ 。

5. 结论

人工湿地在处理污水厂尾水方面有良好的处理效果, 通过组合人工湿地的综合处理, 最终出水能达到 IV 类水质标准, 可以用于周边公园和水系补充用水。

种植美人蕉和花叶芦竹的人工湿地处理效果更优更稳定, 对尾水处理的效果优于鸢尾和旱伞草。

湿地植物对 TN 的处理效果和地下 N 累积量显著正相关; TP 的处理效果和植物生物量以及地下 P 累积量显著正相关。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率与其他指标均不显著性

在人工湿地植物选取时应优先考虑根系生物量大, 泌氧能力强的植物。

基金项目

长江科学院开放研究基金资助项目“河岸带土壤复合污染的植物修复关键技术研究(CKWV20231165/KY)”。

参考文献

- [1] 曾毅夫, 邱敬贤, 刘君, 等. 人工湿地水处理技术研究进展[J]. 湿地科学与管理, 2018, 14(3): 62-65.
- [2] 许丹, 黄铭意, 韩胡威, 等. 三种挺水植物对 CW-MFC 耦合系统脱氮及产电性能的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(7): 1148-1156.
- [3] 张倩妮, 陈永华, 杨皓然, 等. 29 种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 392-402. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0235>
- [4] 程丽芬, 张欣. 5 种水生植物对煤矿废水的适应性及净化效果[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(4): 801-809.
- [5] 曹涛涛, 徐栋, 白国梁, 等. 以 RAS 固体废弃物为碳源的改进型人工湿地对养殖尾水的脱氮效果[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1475-1483+1591.
- [6] 李振灵, 丁彦礼, 白少元, 等. 潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3713-3720. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201701050>
- [7] 吴海露. 人工湿地中植物根系分泌物及其对脱氮过程的影响[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.

- <https://doi.org/10.27307/d.cnki.gsytu.2018.000643>
- [8] 李朝颖, 张蕊芯, 常思露, 等. 黄菖蒲人工湿地系统对含盐再生水中氮磷污染物的去除研究[J]. 工业水处理, 2024, 44(3): 168-176. <https://doi.org/10.19965/j.cnki.iwt.2023-0146>
- [9] Maucieri, C., Salvato, M. and Borin, M. (2020) Vegetation Contribution on Phosphorus Removal in Constructed Wetlands. *Ecological Engineering*, **152**, Article 105853.
- [10] 胡林潮, 周新程, 邓文, 等. 潜流式人工湿地消纳城市污水厂尾水微生物特性及机制[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(6): 135-141.
- [11] 熊家晴, 杜晨, 郑于聪, 等. 植物和基质级配对水平流人工湿地处理污染河水的影响[J]. 工业水处理, 2015, 35(8): 22-25.
- [12] Sawaittayothin, V. and Polprasert, C. (2007) Nitrogen Mass Balance and Microbial Analysis of Constructed Wetlands Treating Municipal Landfill Leachate. *Bioresource Technology*, **98**, 565-570. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.02.002>
- [13] Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., *et al.* (2011) Biochar Effects on Soil Biota—A Review. *Soil Biology and Biochemistry*, **43**, 1812-1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- [14] 高紫荆, 王文悦, 王晓燕, 等. 不同植物组合根际微环境对人工湿地性能及温室气体减排的影响[J/OL]. 生态学杂志: 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20240119.1348.002.html>, 2024-05-03.
- [15] 贾艾晨, 王海阳, 许士国. 复合人工湿地对大连地区污染河水的净化效果[J]. 水电能源科学, 2017, 35(12): 26-29.
- [16] 谭佩阳, 侯志勇, 谢永宏, 等. 湿地植物固体碳源养分释放动态及其对人工湿地水体脱氮效率的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1562-1569.
- [17] 蒋俊贤, 张凯, 王广军, 等. 不同植物搭建人工湿地的根系分泌物组成及其对养殖尾水的处理效果[J]. 淡水渔业, 2023, 53(6): 88-97. <https://doi.org/10.13721/j.cnki.dsyy.2023.06.007>
- [18] Katakai, S., Chatterjee, S., Vairale, M.G., *et al.* (2021) Constructed Wetland, an Eco-Technology for Wastewater Treatment: A Review on Types of Wastewater Treated and Components of the Technology (Macrophyte, Biofilm and Substrate). *Journal of Environmental Management*, **283**, Article 111986.